



# Optimización de usos del suelo en el contexto de rotación de cultivos considerando aspectos productivos y medioambientales

Proyecto de Grado de Ingeniería de Producción  
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

Setiembre 2020

Autores:

Agustín Araujo	5.119.736-5
Agustina Parrilla	4.786.138-6
Santiago Mancebo	5.248.258-5
Valentina Moncalvo	4.579.600-2

Tutor: Dr. Ing. Antonio Mauttone

# Resumen Ejecutivo

La cuenca hidrográfica del Río Santa Lucía es de extrema importancia para la sociedad uruguaya por tratarse de la principal fuente de agua potable para el 60% de la población del país. La actividad agropecuaria intensiva, en particular el cultivo para alimentación de rebaño lechero, produce un impacto ambiental negativo por el arrastre de nutrientes presentes en los fertilizantes que se concentran en los cauces de agua cercanos. Puntualmente, la acumulación de fósforo favorece el crecimiento de cianobacterias, altera el funcionamiento del ecosistema y reduce la calidad del agua.

El propósito del presente trabajo es desarrollar un modelo de optimización matemática que permita determinar una programación para la rotación de cultivos que minimice la exportación de fósforo, y en segunda instancia, minimice los costos de producción asociados. El proyecto se desarrolla en el marco de una línea de investigación que involucra a la Facultad de Ingeniería y al Centro Universitario Regional del Este de la Universidad de la República, junto con el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

El problema de base que se aborda es la decisión de asignar una serie de cultivos a un conjunto de parcelas (comúnmente denominado potrerros) de distintas superficies en cada estación de un horizonte de planificación, teniendo en cuenta sus ciclos de cultivo, aportes nutricionales e impacto medioambiental característicos. Se parte de un modelo previamente desarrollado por el grupo de investigación, que minimiza el fósforo total sujeto a restricciones de productividad y diversidad de cultivos. Posteriormente, se discuten con el grupo de investigación extensiones a dicho modelo, a la vez que se realiza un relevamiento bibliográfico sobre abordajes matemáticos de problemas similares. Como resultado, se formula un modelo que incorpora: costos de producción, transferencia de materia seca entre estaciones utilizando diferentes métodos de almacenamiento, adquisición de ración como suplemento nutricional y requerimientos nutricionales en términos de proteína y energía.

Para incluir estos aspectos se realiza un relevamiento de datos y posterior validación. Una vez desarrollado el modelo y recabados los datos necesarios, se ejecuta para 41 productores familiares que disponen de 792 parcelas, con una superficie total de 9.992 hectáreas. Los resultados alcanzados se presentan de forma global para toda la cuenca y en forma individual para una muestra de ocho productores representativos, seleccionados por las características de sus parcelas. Además, se lleva a cabo un Plan de Pruebas con el fin de evaluar distintos escenarios y medir el impacto de las consideraciones incorporadas.

Los resultados obtenidos indican una exportación de fósforo mínima de 83.505 kg con un costo de 19.309.115 USD para los 41 productores considerados en un período de 4 años (16 estaciones). Se observa que el requerimiento más restrictivo para el objetivo de minimización es la proteína, por lo cual se priorizan los cultivos con alto coeficiente de proteína por kilogramo de fósforo que exporta. Además, las pruebas realizadas verifican que la incorporación de transferencia de materia seca contribuye a reducir significativamente la exportación de fósforo, mientras que el consumo de ración permite satisfacer los requerimientos proteicos en estaciones con producción de materia seca insuficiente.

Finalmente, se culmina este trabajo presentando una guía de gestión de cultivos en la que se define una estructura y una serie de pautas que permiten obtener recomendaciones para la toma de decisiones de los productores. En primera instancia se presentan lineamientos para la asignación de

cultivos a cada parcela, y en segundo lugar para la gestión de reservas a lo largo de las 16 estaciones, en base a los resultados obtenidos.

Palabras clave: rotación de cultivos, exportación de fósforo, optimización, programación lineal entera.